

災害応急復旧用無線遠隔操縦ロボットの開発

拮抗駆動式ゴム人工筋肉によるパラレルリンク型ロボットの有効性

豊田 晃 央

メーカーや機種を問わず汎用重機の運転席にロボットを座らせシートベルトで固定するだけで短時間に災害応急復旧作業を始められる動画像カメラ伝送装置付きの無線遠隔操縦ロボットシステムを開発した。無線通信の周波数は920 MHz および2.4 GHz を中心に様々な周波数帯に対応可能である。またこのロボットには空気圧駆動式のゴム人工筋肉アクチュエータを使用しているため軽量で柔軟性を有し、構造的に振動衝撃に対して優れたコンプライアンス性やロバスト性を持つという特長を有する。本報ではロボットを実機に搭載して行った機能確認試験と今後の展開および将来性について紹介する。

キーワード：ゴム人工筋肉，遠隔操縦ロボット，無人化施工，無線通信，ICT，動画像伝送，災害，応急復旧

1. はじめに

急峻な地形が多い日本の国土では、年間平均でおよそ1000件の土砂災害が発生している。また豪雨による河川の決壊、地震や火山の噴火による土石流災害などのリスクも高い。このような災害が発生した場合には、2次災害を防ぐために治山・治水・砂防・地すべり防止策を図り、周辺住民の安全の確保、道路や鉄道の寸断防止などの被害軽減化に向けた緊急の復旧作業を行う。特にその初動時の作業においては常に危険が伴うため、作業員の安全や周辺環境の変化などに対する厳重な注意と適切な作業進捗が求められている。

開発した遠隔操縦ロボットは、日本全国どの地域においてでも24時間以内にメーカーや機種を問わず、その現場近くにある汎用重機、たとえば油圧ショベルの座席に固定するだけで短時間の内に重機オペレータが安全な場所から無線遠隔操縦による災害応急復旧作業を始められる。このロボットを使用すると、オペレータが運転席に搭乗した感覚で遠隔操作リモコンから滑らかに油圧ショベルを操縦できるので、落石の危険があり人が立ち入ることのできない危険な崩落事故現場などで、軟岩が堆積した土砂や河道を堰き止めている大きな転石あるいは、倒木などの除去作業を迅速に行える。またこのロボットを汎用林業重機に搭載すれば危険な急斜面での伐採作業や放射能汚染地域における間伐による森林再生化にも効果を発揮できるだろう。さらに原発事故現場や劣悪な環境下における建設

解体作業、トンネルの崩落事故や火災現場などの復旧作業など、危険作業を人に代わって行えるこのようなロボットのニーズは今後益々高まっていくと見られる。以降、ゴム人工筋肉による遠隔操縦ロボットの特長を中心に機能確認のため行った試験内容について述べる。

2. 遠隔操縦ロボット概要

(1) 構造

油圧ショベルなど土木建設用重機に搭載するロボットに要求される仕様としては、まず振動衝撃に耐えられることが挙げられる。この遠隔操縦ロボットは、ロボットアームのアクチュエータに空気圧で駆動するゴム人工筋肉を採用しているため、軽量で柔軟性を有しかつ、瞬間的に約20Gの振動衝撃力が与えられても空気圧とゴム材のコンプライアンス性および、ロバスト性を有する構造によって自ら破損すること無く重機の操縦が確実に行えるというメリットがある。油圧ショベルに対応したロボットでは走行レバー用に2軸×2組、作業レバー用に4軸×2組の拮抗駆動式ゴム人工筋肉¹⁾を使用した4本の腕を持つパラレルリンク型ロボットアームにより遠隔制御を行っている。一般的な上腕人型ロボットアームと比較して制御軸数を低減させたシンプルな構造となる(写真-1参照)。

このような機構にすることによって空気圧の消費流量を少なくすることができDC駆動型の小型コンプ

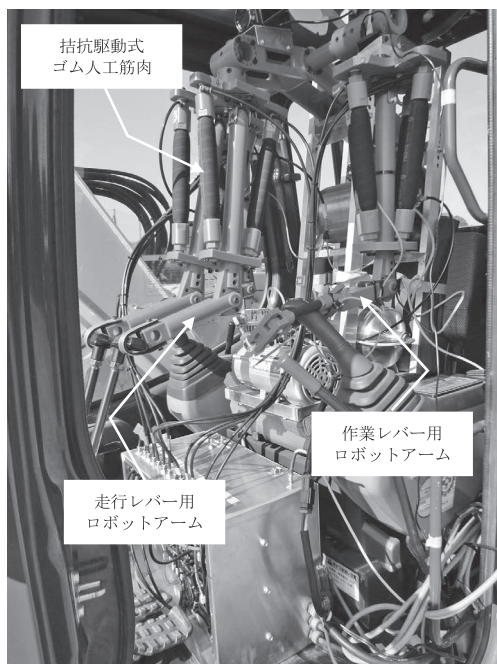


写真-1 ロボット搭載状況

LESSA (DC24 V 駆動, 消費電力 360 W) 1 台で 4 本腕のロボットアームを同時駆動させられるようになった。またゴム人工筋肉の空圧制御系には ON-OFF ソレノイドバルブを用いた PWM 駆動方式を採用し圧力フィードバックによる PID 制御を行うことにより一般的な空気圧サーボ弁を使用したシステムと比較しても消費流量を格段に低減できる。結果的にロボット本体の総重量を 30 kg 以下にすることが可能となり、さらに 2 ユニットに分割できる構造とすることにより容易に持ち運べるようになった。油圧ショベルへの搭載時間もロボットを運転席の座席に座らせシートベルトで固定するだけなので 30 分程度で済む。

(2) 無線通信

無線通信方式に関しては、ロボットアーム制御用に回析性に優れた 920 MHz 周波数帯、カメラ動画像伝送には 2.4 GHz 周波数帯を使用し、見通しで数百 m の通信距離を可能とした (表-1 参照)。将来的には通信距離 1 km を実現すべく現在改良を進めている。

表-1 無線通信仕様

ロボット用無線通信仕様	
周波数帯	923.3 ~ 928.1 MHz
通信方式	双方向
チャンネル数	25ch/1ch 占有帯域 500 kHz
カメラ動画像伝送装置	
周波数帯	2400 ~ 2497 MHz
通信方式	単方向
チャンネル数	12 ch/1 ch 占有帯域 8 MHz

3. 実機搭載による機能確認

遠隔操縦ロボットを実機に搭載して各機能確認を直接目視確認遠隔操作方式で行った (表-2 参照)。以降、機能確認の各内容について述べる。

表-2 機能確認内容

時期	場所／確認作業	搭載重機
2014 年 5 月 フェーズ 1	さがみロボット産業特区 (旧新磯高校) ／走行時におけるロボット操縦性	住友建機 油圧ショベル SH75 (7.5 t 仕様)
2014 年 6 月 フェーズ 2	道路工事現場 (藤沢市圏央道バイパス) ／掘削時におけるロボット操縦性	住友建機 油圧ショベル SH120 (12 t 仕様)
2014 年 9 月 フェーズ 3	秩父デモセンター (日本キャタピラー) ／リモコン建機との比較	キャタピラー 油圧ショベル 320E (20 t 仕様)

(1) 走行時におけるロボット操縦性

はじめに走行時における課題の検証を行った。フェーズ 1 では建機に生じる振動衝撃力に対して拮抗駆動式ゴム人工筋肉の有効性を確かめるため、油圧ショベル 7.5 t 仕様を搭載して走行時における振動衝撃に対するロボット操作性を確認した。試験フィールドは神奈川県のがみロボット産業特区²⁾で開放されている廃校のグラウンドで試みた (写真-2 参照)。当グラウンドは平坦ではあるが表面は固く比較的周波数が高い振動が及んだ。結果としてロボットには垂直方向に最大約 10 G の衝撃力を受けたが、ロボット操縦性及び建機の走行性に異常を生じなかった。なお予想をしていなかった事象として、ロボットを乗せた座席が前後に大きく揺れ、ロボットの上で 5 cm 程の振幅でおよそ 5.8 G の衝撃力が発生していた。このような状況下では走行レバー用ロボットアームに直接



写真-2 走行確認試験の様子

この振幅が伝わり油圧ショベルの走行に影響を与えない。しかしこのロボットが操縦不能に陥らなかった要因を検証すると拮抗駆動式ゴム人工筋肉のコンプライアンス効果が有効に働いていたと見られる。これは建機にオペレータが乗り直接操縦する場合、このような前後方向の振幅が生じた際には自身の腕の力を抜き、いわゆる車のハンドル操作で言われる遊びを有しながら操縦していたものと考えられる。通常のサーボモーター駆動式のロボットシステムでは、この遊び機能をアクティブ制御で実現しなければならないところ、拮抗駆動式ゴム人工筋肉ロボットシステムではパッシブ的に簡単に遊び機能を実現できるという特長を顕著に現している。

(2) 掘削時におけるロボット操縦性

次に盛土の土砂をダンプに積み込む作業における課題の検証を行った。フェーズ2のポイントとしては大きく二つの観点で確認作業を試みた。第一のポイントとしてはフェーズ1で使用した建機と同メーカーのもののだがサイズを12t仕様に変えて初めてロボットを搭載するという状況で確認作業を行った。第二のポイントとしては遠隔操縦を行ったことがない初めてリモコンにふれる建機のオペレータに作業をしてもらうという状況で確認作業を行った。

このロボットには安全対策機能として遠隔で建機エンジンの始動停止機能、ロボット電源用として建機バッテリーへの接続やエンジン回転数のコントロールなど、ロボットと建機電装系とのインターフェースを接続する必要がある。そのためにロボット搭載時に建機の電装系を確認して所定の配線を行わなければならない。結果は同メーカーの建機ということもありインターフェースの確認作業も含めて約30分でロボットの搭載作業を完了することができた。

次にロボットを搭載して基本的な遠隔操縦方法をオペレータに教示した後、土砂掘削及びダンプへの土砂積み込み作業を試みた(写真—3参照)。結果は15分程のトレーニングを行った後、ダンプへ土砂積み込みが可能となった。オペレータに対するヒアリングでは、作業性に関してたとえばリモコンの操作レバーのサイズや形状などに対する要求や建機の操縦精度や応答性などに課題が残るものの、概ね直感的に操作しやすいというコメントを得られた。操作性に関して検証すると、この遠隔操縦の基本システムは、リモコンの操作レバーの倒し角に対し拮抗駆動式ゴム人工筋肉の作動力を比例させてロボットアームを動かす仕組みとなっている。故にオペレータの目視で恰も自分の腕と



写真—3 土砂積み込み作業状況

同様な操作で建機の作業レバーをロボットアームが動かしているの直感的に操縦方法を認識しやすいものと考えられる。

(3) リモコン建機との比較

雲仙普賢岳を代表とする無人化施工などにおいて重機メーカーでは様々なリモコン仕様の建機を生産している。一般的にリモコン建機は内蔵された油圧作動弁を外部信号によって比例制御できる制御弁に組み替え、特定小電力仕様の無線を用いてリモコンで直接制御弁を作動させる仕組みである。フェーズ3ではリモコン仕様の20tクラスの油圧ショベル(写真—4)と遠隔操縦ロボットを搭載した同等の汎用油圧ショベル(写真—5)を用い同じオペレータで遠隔操縦の差異について検証してみた。

リモコン仕様の建機の場合は油圧ショベルのブームやバケットなど各々の油圧系統を直接制御しているため、通常のオペレータが搭乗して運転する場合と比較して応答が速くなる傾向がある。加えて複合動作を行う上で各比例制御弁を同調させる必要が生じるが、ある程度細かく調整は行いうものの調整にかかる時間や費用を考慮すると限度がある。したがってオペレータはリモコン建機の運転特性を熟慮した上で作業を行うこ



写真—4 リモコン仕様の建機



写真—5 遠隔操縦ロボットを搭載した建機

とになり、汎用建機の操縦と比較すると作業性に劣る傾向がみられる。

一方、遠隔操縦ロボットを搭載した汎用油圧ショベルの場合には、フルチューニングを終えたりリモコン建機と比較して作業性に優る汎用建機の操作レバーを直接に遠隔操作するため、オペレータが建機の応答性能の相違を特に気にすることはない。このことは前節(2)でも述べている通り、オペレータが直感的に操作しやすいことにも共通している。加えてロボットの制御パラメータを調整することにより、建機の操作レバーの応答性能を個別にコントロールすることもできる。例えばブームの上げ下げに関して上げ方向の動作は速くまた、下げ方向の動作は遅くしたり、同様にバケットの掘削方向の動作を遅くまた、開き方向の動作を早くしたりすることも可能となる。

以上、フェーズ1からフェーズ3を通じて初歩的な機能検証の段階ではあるが遠隔操縦ロボットを使用した時の特長やメリットを少なからずとも確認することができた。

4. 今後の展開および将来性

(1) 利便性および実用性

様々な災害応急復旧作業を対象とした無人化施工に関する新技術を確認するためには、施工方式に合わせ油圧ショベル、ブルドーザ、ダンプ、振動ローラーや各種アタッチメントなどに対応したリモコン重機を採用する必要性が生じる。しかし無人化施工で使用できる専用リモコン重機は数や適用機種が少なく汎用機に比べ高価であるため、独自の施工方法の確立には多大な時間とコストが生じてしまう。特に原子力災害に関する無人化技術に関しては、放射能汚染地域で使用し

た重機は基本的に汚染管理区域外での再利用ができないため、メンテナンスや使用後の処理などを考慮すると汎用的な運用は難しい。

一方、重機メーカー側からしても重機の本体システムの高機能化、ICT化が進み、電装系等にCAN(Controller Area Network)が採用されつつあるため、一時的にでも簡便に汎用重機をリモコン仕様に改造することが困難な環境となってきた。そのため重機本体の改造を行う必要がない外付けアクチュエータまたはロボットによるリモコン化の必要性が増している。

(2) 経済性

前節のような背景を鑑み、メーカーや機種を問わず重機を簡単に遠隔操縦仕様への変更を可能とする遠隔操縦ロボットは、外付けアクチュエータの高機能タイプとして有望である。ユーザー側からみても既存の汎用重機を必要とされる施工方法に合わせて自在に選択できるため新たな試みを短時間でかつ、低コストで実行し易い。加えて3Kと呼ばれる土木建設現場における少子高齢化による人手不足、特に若者の職離れと熟練オペレータの高齢化などに関しても、ロボットを使用することにより注目度が増し、現実的にこれら諸課題に対して作業環境の改善や熟練者のノウハウや技術のデータベース化および、継承が容易になると考えられる。仮に様々な用途に汎用的に使用されることになれば運用台数は増え、低価格を実現できる。結果的にレンタル・リース網に乗り用途がさらに拡大され、災害応急復旧用途だけでなく一般の土木建設工事にも採用されていくだろう。

(3) 公共性

災害はいつでもどこでどのような事象が起こるかを予測することは現状のテクノロジーでは難しい反面、実際に災害が発生した場合には初動対策をふまえて迅速な応急復旧が求められる。誰でもいつでもどこでも簡単にロボット技術を活用することができれば、日本全国あるいは世界的な規模で汎用的に無人化復旧作業を実現できるメリットがある。

またロボット活用時の公益性を考慮する上でもロボット機能の汎用性を広げ、その利用価値を高めたより人の動作に近いロボットシステムを作り上げる必要もある。たとえば無線遠隔操縦で人と全く同じ機能を有するロボットによって人が近づけない場所で応急復旧作業ができれば、その遠隔操作者は自分の分身のように直感的にロボットの動きを把握して作業効率を格段に向上させることができる。このように遠隔操縦ロ

ボットが進化していけば、未経験者や女性でも快適な環境で容易に作業が行えるようになり、については土木建設現場にも若者や女性の参入が増え人手不足の解消、熟練技術の継承を担保できるであろう。

(4) 特殊環境下での運用

遠隔操縦ロボットは基本的に人が立ち入れない危険な場所での作業を想定しているが特に原子力災害の応急復旧や廃炉作業などにその効果を発揮できるだろう。またこのロボットは耐環境性能に優れており、豪雨の中での作業や水深5m程度であれば水中バックホウに搭載して応急復旧作業も行える可能性がある。将来的にはLED可視光無線通信による深海土木用遠隔操縦ロボットへ応用展開し開発を進めて行きたいと考えている。

5. おわりに

今回の機能確認作業は直接目視型遠隔操作方式のみで行ったが、次回のテーマとしてはカメラ動画像伝送装置を取り込んだ非ネットワーク型遠隔操作方式での

検証を試みる予定である。また現在、この遠隔操縦ロボットは国土交通省の次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進事業³⁾の現場検証対象技術に採択され、平成26年度中に実証確認を行う予定である。その結果をふまえ来年度には販売を開始する予定で計画を進めている。

J C M A

《参考文献》

- 1) 第12回運動と振動の制御に関する国際会議
MOVIC2014 論文発表「Joint control of a lower-limb robot with musculoskeletal structure」
- 2) 神奈川県さがみロボット産業特区
<http://sagamirobot.com/>
- 3) 次世代社会インフラ用ロボット開発・導入の推進（災害応急復旧技術）
<http://www.c-robotech.info/>

〔筆者紹介〕

豊田 晃央（とよだ てるお）
コーワテック(株)
開発部長

